

# La Vigilancia de la Atmósfera Global: historia de una contribución al control del clima

por Ed Dlugokencky<sup>1</sup>, John Miller<sup>2</sup> y Johannes Staehelin<sup>3</sup>

En su origen, las labores de seguimiento de los componentes traza atmosféricos estaban impulsadas por la mera curiosidad científica. Sin embargo, no transcurrió demasiado tiempo hasta que empezaron a plantearse preguntas acerca de la conexión existente entre los incrementos observados en determinadas sustancias químicas traza y las actividades humanas, así como sobre las consecuencias que podrían afectar a la humanidad si tales sustancias siguieran sin disminuir. Durante los últimos sesenta años, la OMM ha prestado una importante aportación a la hora de convertir ciertas actividades impulsadas por la ciencia en trabajos de vigilancia con carácter regular.

La OMM se embarcó formalmente en un programa de química atmosférica y aspectos meteorológicos de la contaminación atmosférica en el curso de los años cincuenta. La recopilación de información adecuada acerca de la composición química de la atmósfera y sobre las consecuencias del impacto antropogénico a escala mundial sólo resulta posible si todas las medidas pertinentes se expresan en las mismas unidades o con arreglo a la misma escala; las mediciones llevadas a cabo por diferentes países y en diferentes emplazamientos deben ser comparables.

El primer paso hacia la coordinación internacional de las medidas químicas

1 NOAA; Presidente del Grupo de asesoramiento científico sobre gases de efecto invernadero de la VAG de la OMM

2 NOAA

3 ETH-Zurich; Presidente del Grupo de asesoramiento científico sobre el ozono de la VAG de la OMM

Las observaciones a escala mundial deben mantenerse en el futuro, con el fin de controlar la eficacia de las políticas aplicadas para mitigar el cambio climático.

fue llevado a cabo por la OMM durante el Año geofísico internacional de 1957. La OMM asumió la responsabilidad de desarrollar procedimientos operativos normalizados para lograr observaciones uniformes sobre el ozono y creó el Sistema Mundial de Observación del Ozono (SMOO<sub>3</sub>). Puso en marcha una red coordinada de espectrofotómetros Dobson, y más tarde Brewer, destinada a medir el ozono atmosférico total. El sistema también incluye observaciones de ozonosondas e intercomparaciones, la preparación de los *Boletines sobre ozono antártico* de la OMM, la *Evaluación científica sobre el agotamiento del ozono* de la OMM/PNUMA (de periodicidad cuatrienal) y apoyo al Centro mundial de datos sobre el ozono y la radiación UV de la OMM en Canadá.

A finales de los años sesenta se creó la Red de estaciones de control de la contaminación general atmosférica (BAPMoN), que se centraba en la química de las precipitaciones y en las medidas de aerosoles y de dióxido de carbono; incluía estaciones regionales y generales, y contaba con un Centro mundial de datos de la OMM localizado en los Estados Unidos de América.

Durante los años setenta se abordaron tres importantes cuestiones atmosféricas, a saber: (1) la amenaza de los clorofluorocarbonos (CFC) para la

capa de ozono; (2) la acidificación de lagos y bosques en amplias zonas de América del Norte y Europa, debido principalmente a la conversión del dióxido de azufre en ácido sulfúrico en la atmósfera, y (3) el posible calentamiento global, originado por la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. En la actualidad, cada uno de estos temas es objeto de tratados o convenios internacionales. El desarrollo inicial de estos acuerdos y las evaluaciones posteriores de las medidas de mitigación que contienen han dependido en gran medida de la información obtenida a partir del programa de vigilancia de la composición atmosférica desarrollado por la OMM.

En 1989, las dos redes de observación BAPMoN y SMOO<sub>3</sub> se consolidaron en el seno del programa actual de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la OMM.

El programa de control de la VAG incluye una red mundial coordinada de estaciones de observación, junto con instalaciones de apoyo y grupos de expertos. En la actualidad, el programa de la VAG coordina actividades y datos procedentes de 26 estaciones mundiales (Figura 1), 410 estaciones regionales completamente operativas y 81 estaciones colaboradoras también plenamente operativas



Figura 1 — Estaciones mundiales de la VAG (a fecha de noviembre de 2009)

(<http://gaw.empa.ch/gawsis>). Dos de los emplazamientos regionales fueron ascendidos a la categoría de estaciones mundiales en 2009 (Cabo Verde y Trinidad Head).

El programa de la VAG ofrece datos destinados a las evaluaciones científicas y a las alertas tempranas de cambios en la composición química y en las características físicas de la atmósfera que pudieran dar lugar a efectos adversos sobre el medio ambiente. Las tareas de control han puesto su acento en los gases de efecto invernadero y en los aerosoles para analizar el posible cambio climático, en el ozono y en la radiación ultravioleta para temas de naturaleza climática y biológica, y en determinados gases reactivos y en la química de las precipitaciones por lo que respecta a numerosos factores asociados a la química de la contaminación.

## Determinación de las variables climáticas esenciales

Tal y como ha subrayado el cuarto Informe de evaluación del Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC), las observaciones han confirmado que el calentamiento del sistema climático resulta evidente. Las observaciones a escala mundial deben mantenerse en el futuro, con el fin de controlar la eficacia de las políticas aplicadas para mitigar el cambio climático.

La oficina de la VAG de la OMM y los máximos responsables de sus

grupos de asesoramiento científico se han implicado de manera muy activa en las tareas de apoyo a la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC) a través de aportaciones al Plan estratégico de ejecución del segundo informe sobre la adecuación de los sistemas mundiales de observación relacionados con el clima, llevado a cabo por la Estrategia mundial de observación del clima. El documento reconoce, de forma oficial, las variables climáticas esenciales (ECV) que han de medirse sistemáticamente a nivel mundial con el fin de abordar los asuntos de mayor importancia. En el campo de la composición atmosférica estas variables son el dióxido de carbono, el metano y otros gases de efecto invernadero de larga vida, el ozono y los aerosoles, respaldados por sus precursores (en particular, óxido nitroso, dióxido de azufre, formaldehído y monóxido de carbono).

La mayor parte de las ECV relacionadas con la composición química de la atmósfera se observan en el marco del programa de la VAG. Todas y cada una de las variables requiere una importante infraestructura de apoyo a fin de crear un sistema de observación mundial, que incluya los siguientes componentes:

- Laboratorio central de calibración (CCL), que conserva un Patrón primario y una escala.
- Centro mundial de calibración (WCC), que garantiza la calidad de las medidas vinculando las observaciones in situ con un patrón primario.

- Red de infraestructuras y observación con cobertura mundial.
- Un centro mundial de archivo y análisis de datos donde se almacenen, analicen y difundan datos de calidad controlada.
- Grupos de asesoramiento científico sobre supervisión y equipos de expertos para todos los aspectos de la red.

Todos juntos, estos componentes ayudarán a garantizar la medición a escala mundial de importantes componentes de la atmósfera que afectan al clima.

## Vigilancia del ozono

Las proyecciones de un clima en cambio han añadido una nueva dimensión al tema de la capa de ozono estratosférico y su recuperación. Los nuevos datos y modelos muestran las interconexiones existentes entre estas dos cuestiones que son objeto de preocupación medioambiental mundial. El enfriamiento previsto en la estratosfera (atmósfera superior, entre 10 y 50 kilómetros de altura aproximadamente) ralentizará la recuperación del ozono en las regiones polares. Por otro lado, las sustancias químicas que agotan el ozono y el propio ozono dan lugar a un forzamiento positivo del clima, de modo que la reducción de las sustancias que agotan el ozono no solo ha ayudado a la recuperación de la capa del mismo, sino que también ha disminuido el forzamiento climático.

Siguiendo las directrices del programa de la VAG de la OMM se han llevado a cabo medidas regulares de la columna de ozono por medio de espectrofotómetros de rayos UV situados sobre la superficie terrestre. Los globos sonda meteorológicos transportan instrumentos desde la superficie de la Tierra hasta altitudes de 30 ó 35 kilómetros, con el fin de medir la distribución vertical del ozono (Figura 2). En la actualidad, la Red mundial de vigilancia de la capa de ozono de la VAG de la OMM consta de 132 estaciones que miden el ozono total a través de una combinación de espectrofotómetros Dobson y Brewer, y de 63 estaciones que miden el perfil del ozono mediante ozonosondas. Los emplazamientos de lanzamiento de ozonosondas son gestionados por la VAG de la OMM, por la Red de



*Figura 2 — Lanzamiento de una ozonosonda en la estación de la VAG de Ushuaia (Argentina). Estas observaciones, que son llevadas a cabo por el Servicio Nacional de Meteorología de Argentina y que están patrocinadas por la Agencia Estatal de Meteorología y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial de España, representan una importante contribución a la vigilancia del agujero de la capa de ozono antártica.*

ozonosondas adicionales del hemisferio sur (SHADOZ) de la NASA y por la Red para la detección de cambios en la composición atmosférica (NDACC).

La red de vigilancia de la capa de ozono cuenta con un sistema establecido de control de calidad, que incluye algunos CCL (en la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera de los Estados Unidos (NOAA) para los instrumentos de tipo Dobson y en las instalaciones del Servicio Medioambiental de Canadá para los instrumentos de tipo Brewer), varios WCC (mantenidos por los respectivos CCL) y centros regionales de calibración en Alemania, Argentina, Australia, España, Estados Unidos, Japón, República Checa, Rusia y Sudáfrica.

La Agencia Estatal de Meteorología de España acoge el Centro regional de calibración Brewer para Europa (RBCC-E), designado oficialmente por la OMM en noviembre de 2003. Consta de una tríada de espectrofotómetros Brewer. Junto con la tríada de dispositivos Brewer de las instalaciones del Servicio Medioambiental de Canadá, en Toronto, estos dispositivos dan forma a un sistema internacional de calibración Brewer, con procedimientos para garantizar la calidad que son similares a los de la red Dobson.

Además de dar servicio a los 50 espectrofotómetros Brewer en Europa, el RBCC-E también tiene a su cargo las estaciones situadas en el norte de África (Casablanca y El Cairo). En septiembre de 2005 y de 2007 el RBCC-E organizó en España las dos primeras intercomparaciones Brewer regionales de la VAG para Europa, mientras que las campañas más recientes se celebraron en septiembre de 2009.

En diciembre de 2006, en Buenos Aires, se llevó a cabo una intercomparación Dobson que afectó a instrumentos de Argentina, Brasil, Cuba, México, Perú y Uruguay, y está prevista una nueva intercomparación para 2010 ó 2011. En Irene (Sudáfrica), se llevó a cabo una intercomparación de instrumentos Dobson africanos en octubre de 2009.

Una reciente comparación entre los datos de columna de ozono medidos por satélite y las mediciones realizadas desde la superficie terrestre puso de manifiesto la necesidad de volver a calcular algunas series largas de ozono total. Con objeto de prestar el apoyo necesario para homogeneizar esas series, la séptima reunión de los Administradores de la investigación en materia de ozono de las Partes del Convenio de Viena recomendó la convocatoria de un cursillo sobre

reevaluación de datos para los responsables de los datos en las estaciones, que está programado para 2010.

## Medida de los gases de efecto invernadero

Comprender el balance global de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera y predecir su evolución con arreglo a los escenarios climáticos futuros representa uno de los principales desafíos a los que la ciencia debe enfrentarse en la actualidad. Uno de los problemas radica en distinguir entre fuentes naturales y antropogénicas, lo que requiere contar con mediciones precisas a nivel mundial. Asimismo, resulta fundamental resolver la incertidumbre asociada a los sumideros naturales del ciclo del carbono de cara a las predicciones climáticas, debido a las realimentaciones que tienen lugar entre el cambio climático y los depósitos de carbono.

Tal y como se informó en el Boletín sobre gases de efecto invernadero de noviembre de 2009, publicado por la VAG de la OMM, las proporciones de mezcla medias mundiales de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso alcanzaron nuevos máximos en 2008, con el dióxido de carbono en niveles de 385,2 ppm (número de moléculas de gas por millón de moléculas de aire seco), el metano en cifras de 1 797 ppb (partes por mil millones) y el óxido nitroso alcanzando cotas de 321,8 ppb (Figura 3). Estas cifras eran superiores a las existentes en la época preindustrial (antes de 1750) en un 38 por ciento, un 157 por ciento y un 19 por ciento respectivamente. Estos datos fueron obtenidos a partir de las observaciones de los gases de efecto invernadero llevadas a cabo en el marco del programa de la VAG.

La OMM coordina las actividades de la red de observación de gases de efecto invernadero, en la que participan las organizaciones nacionales de vigilancia asociadas, e incluye un CCL que conserva los patrones primarios relativos a las medidas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, así como la Escala mundial de referencia de la OMM para gases de efecto invernadero reconocida por la Oficina internacional de pesas y medidas. La citada red incluye centros mundiales y regionales de calibración mantenidos por organismos colaboradores de



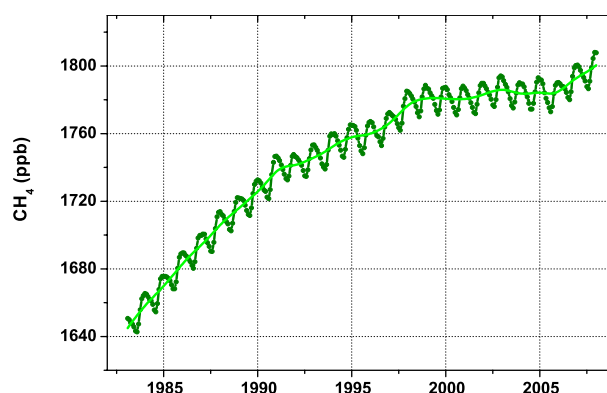
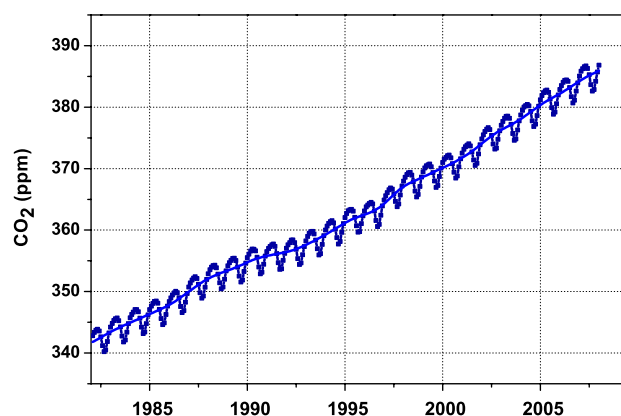


Figura 3 — Las proporciones de mezcla medias mundiales de dióxido de carbono y metano alcanzaron nuevos máximos en 2008, los mayores niveles registrados desde la época preindustrial.

la OMM, lleva a cabo auditorías de las estaciones, desarrolla procedimientos operativos normalizados y directrices para realizar las mediciones, y gestiona un proceso de examen continuo de los objetivos de calidad de los datos y de los requisitos de medición a través de seminarios bienales de expertos de la OMM y del Organismo internacional de energía atómica (OIEA). El Laboratorio de investigación sobre el sistema terrestre (ESRL) de la NOAA gestiona una red que colabora con la VAG, constituye un socio importante de la red integral y custodia los patrones primarios de la OMM para las medidas de dióxido de carbono, metano y óxido nítrico. Muchos otros participantes en la VAG (entre los que se incluyen Australia, Canadá, Francia, Japón y Suiza) también contribuyen a la red integral, con arreglo a las directrices de medición y a los objetivos de calidad de datos del citado programa. Los datos de medición con calidad controlada son presentados, archivados y difundidos por el Centro mundial de datos sobre gases de efecto invernadero, con sede en la Agencia Meteorológica de Japón.

A través de las reuniones bienales de expertos, copatrocinadas por la OMM y la OIEA, se lleva a cabo un proceso de examen continuo de los objetivos de calidad en los datos. La primera reunión de este grupo de expertos se celebró en 1975 en el Instituto Scripps de Oceanografía y fue copatrocinada por la OMM. Esta reunión supuso un hito en el liderazgo de la vigilancia de los gases de efecto invernadero por parte de la NOAA.

En octubre de 2005, el comité de dirección del Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), que está copatrocinado por la OMM, aprobó el acuerdo SMOC-VAG en el cual se creaba la "Red de vigilancia

mundial de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> atmosférico de la VAG de la OMM" como una red integral del SMOC; el ozono también constituye una variable del SMOC.

La red mundial de la VAG para observaciones de dióxido de carbono desde la superficie incluye 180 estaciones (Figura 4). La obtención de distribuciones y tendencias globales de una variable concreta con una resolución suficiente como para ofrecer estimaciones cuantitativas de las fuentes y sumideros regionales de los gases de efecto invernadero no solo requiere estaciones situadas en la superficie terrestre, sino también la realización de observaciones desde aeronaves y por satélite.

Otras mediciones in situ facilitarán los recursos de observación necesarios para llevar a cabo análisis regionales. Las medidas de la composición isotópica del dióxido de carbono y del metano pueden ayudar a distinguir entre diversas fuentes de emisión y, de esa manera, mejorar nuestro conocimiento acerca del balance de estos gases. Algunos observatorios de la red de la VAG ya realizan estas mediciones. Además, el desarrollo de técnicas nuevas y más precisas de medición, como por ejemplo la espectroscopía láser de cavidad *ring-down*, debe tener en cuenta la composición isotópica del dióxido de carbono y del metano en el proceso de calibración.

Varios proyectos y redes contribuyen a facilitar una imagen tridimensional de la distribución de gases de efecto invernadero. Concretamente, los científicos japoneses están utilizando las aerolíneas japonesas mientras que los investigadores europeos están trabajando en el marco del proyecto CARIBIC (<http://www.caribic-atmospheric.com>).

La necesidad de validar los datos satelitales y aquellos otros obtenidos a lo largo y ancho del planeta ha llevado a desarrollar la Red de observación de la columna total de carbono (TCCON) de espectrómetros de formación de imágenes por transformación de Fourier con barrido ascendente (<http://www.tcccon.caltech.edu>). Las mediciones de la red TCCON, una vez calibradas, pueden ayudar a validar las medidas de satélite obtenidas a partir del instrumento SCIAMACHY, y también las del GOSAT y las de los futuros satélites OCO2. La red TCCON, que colabora estrechamente con la NDACC, fue creada en 2004 y se convirtió en una red colaboradora de la VAG en 2009.

Además de los principales gases de efecto invernadero, algunos otros potentes gases de efecto invernadero también se vierten a la atmósfera a través de la actividad de los seres humanos. En la actualidad, los halocarbonos son uno de los causantes del forzamiento radiativo mundial, desempeñando un papel comparable al del óxido nítrico. Algunos halocarbonos (los CFC y la mayor parte de los halones) están disminuyendo lentamente como resultado de la reducción en las emisiones con arreglo al Protocolo de Montreal relativo a sustancias que agotan la capa de ozono, mientras que otros (HCFC y HFC) están aumentando a gran velocidad.

## Entender el papel de los aerosoles

Los aerosoles atmosféricos desempeñan un importante papel en el cambio climático e influyen en el balance energético de la atmósfera de forma tanto directa como indirecta.

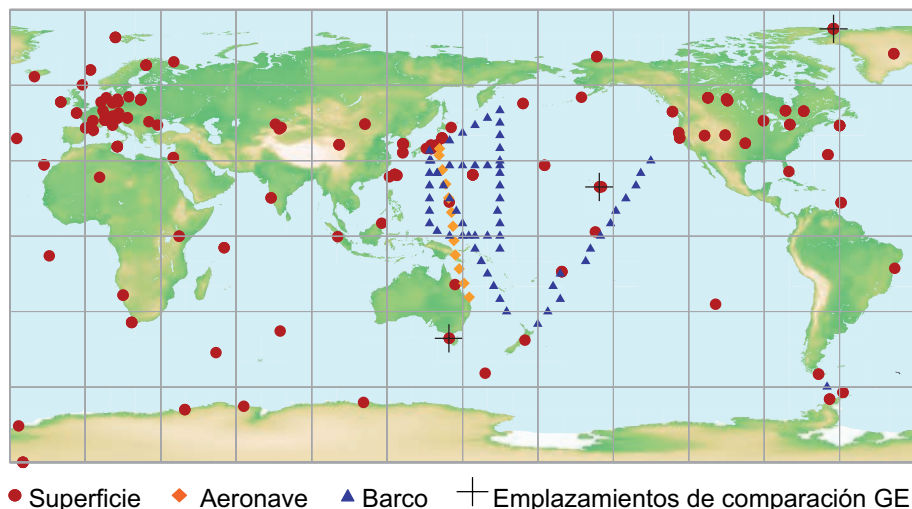


Figura 4 — Configuración actual de la red integral de la VAG para las observaciones de dióxido de carbono.

Directamente, los aerosoles modifican la difusión y la absorción de la radiación y, posteriormente, afectan al albedo planetario (o sea, la manera en que la Tierra refleja la radiación) y al sistema climático mientras que, en términos indirectos, un aumento en la concentración de aerosoles antropogénicos eleva la de los núcleos disponibles para la condensación de las nubes. Se cree que este proceso modifica la concentración del número de gotas en una nube para un contenido de agua líquida constante en ella, y que el incremento resultante en el albedo de las nubes influye en el balance radiativo de la Tierra.

Varias redes contribuyen a la medición de aerosoles en el marco del programa de la VAG. Se trata de los emplazamientos del Sistema robótico de medida de aerosoles, de la Red de observaciones lidar de aerosoles de la VAG y de la Red de medida de la radiación solar de fondo. Algunas redes regionales de medición relacionadas directamente con las propiedades de los aerosoles se encargan de los aspectos relativos a la calidad del aire y a la acidificación, y también prestan apoyo a las tareas de calibración y validación satelital.

Los participantes de la VAG se esfuerzan por ofrecer observaciones precisas, exhaustivas y puntuales acerca de los parámetros de los aerosoles, entre los que se incluyen la profundidad óptica, la concentración de masa y los principales componentes químicos para dos fracciones de tamaños, así como la difusión y la absorción de la luz.

La creación de un WCC para la larga lista de parámetros de los aerosoles constituye una labor importante de cara a garantizar la alta calidad de los datos; a la vista de ello, se decidió distribuir esta tarea entre dos instituciones diferentes. El Instituto de investigación troposférica de Leipzig ha accedido a acoger el WCC para los parámetros físicos, pero todavía falta por asignar el anfitrión del WCC para los parámetros químicos.

Las mediciones satelitales, comenzando con las procedentes del radiómetro perfeccionado de muy alta resolución, ofrecen información a largo plazo sobre la profundidad óptica de los aerosoles, y las recientes misiones de investigación en materia de aerosoles no solo están suministrando medidas más precisas de la profundidad óptica, sino también datos acerca del tamaño, tipología y perfil vertical de los aerosoles.

## Estimulando la medida de los precursores de aerosoles y ozono

Los cambios en la composición de la capa inferior de la atmósfera, la troposfera, tienen consecuencias sobre la calidad del aire y sobre el cambio climático. El ozono y los aerosoles troposféricos son activos desde el punto de vista radiativo y también son sustancias contaminantes del aire. Otros gases traza, como los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre y los formaldehídos, tienen un efecto radiativo directo insigni-

ficante pero son los precursores del ozono troposférico y de los aerosoles secundarios (aquellos que se forman en la atmósfera). El metano es un precursor del ozono troposférico y del vapor de agua estratosférico, así como un gas de efecto invernadero. Las observaciones de los precursores son necesarias para contar con una perspectiva basada en las emisiones y relacionada con el forzamiento radiativo (debido tanto a fuentes antropogénicas como naturales) provocado por el ozono troposférico y por los aerosoles secundarios.

Las observaciones mundiales de los precursores también se llevan a cabo en el seno del programa de la VAG (en el grupo de los gases reactivos). Algunas de las redes ya han alcanzado un grado de madurez considerable y cuentan con todos los elementos necesarios (por ejemplo, en relación con el monóxido de carbono), mientras que otras se encuentran en fase de creación. En 2006 se creó una red para los compuestos orgánicos volátiles, que sirven de precursores para el ozono troposférico. En octubre de 2009 tuvo lugar un seminario de la VAG en Hohenpeissenberg, con la intención de crear una red de observaciones mundiales de diversos óxidos de nitrógeno.

## Un legado continuo

La OMM posee una dilatada trayectoria de trabajo en cuestiones de índole atmosférica, que se ha visto continuada a través del programa de la VAG. El programa se halla en proceso de evolución, llenando las lagunas de conocimiento existentes en los parámetros de medición, creando nuevas instalaciones centrales y elevando el número de observaciones. Este progreso se debe a la dedicación y a las contribuciones de muchos científicos de todo el mundo, algunos de los cuales ya no están entre nosotros, pero de cuyos esfuerzos seguimos beneficiándonos todos.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a Oksana Tarasova y Geir Braathen, así como a la Secretaria de la OMM, por sus aportaciones y su trabajo en este artículo. Para más información, visite: <http://www.wmo.int/gaw>.